

Куштанова Галия Гатинишна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЕ

25.00.29- Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Казань-2007

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Якимов Н.Д.

доктор физико-математических наук
Храмченков М.Г.

доктор технических наук

Рамазанов А.Ш.

Ведущая организация - Российский государственный университет нефти и газа
им. И.М. Губкина (г. Москва)

Защита состоится «_1_»_ноября_____ 2007 г. в 14.30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном
университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18 , ауд.110

С диссертацией можно знакомиться в библиотеке КГУ им. Н.В.Лобачевского

Автореферат разослан «____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь

специализированного диссертационного совета

доктор физико-математических наук

профессор

А.В.Карпов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Подземная гидросфера - совокупность всех видов подземных вод. Подземная гидросфера пронизывает всю литосферу. Нижняя граница гидросферы принимается на уровне поверхности мантии (поверхности Мохоровичича). Иногда, в более узком смысле, это воды, находящиеся в верхней (до глубины 10 км) части земной коры.

С процессами образования и трансформации вод связано и формирование месторождений полезных ископаемых. Залежи жидких углеводородов неотделимы от воды. Они содержат поровую воду, подстилаются подземными водами, разрабатываются методом заводнения, фильтруются совместно с водой. Вследствие диффузии, фильтрации или утечек углеводороды попадают в пласты пресной воды, формируют поля газов в приземном слое атмосферы.

Разработка физических моделей процессов, происходящих в подземной гидросфере, и их описание являются важной задачей. Для проверки адекватности моделей и заложенных в них гипотез требуются результаты физического эксперимента. При проведении исследований подземной гидросферы единственным каналом для прямых измерений в земной коре являются скважины. Наиболее плотная их сеть сопутствует разрабатываемым месторождениям природных ресурсов, именно здесь накоплен наибольший опыт наблюдений за потоками флюидов и тепла и существуют возможности апробации на основе экспериментальных данных моделей фильтрации жидкостей. Поэтому скважина в данной работе рассматривается как важнейший элемент натурной экспериментальной измерительной системы. Одновременно с этим, ограниченность возможностей экспериментальных исследований в литосфере повышает роль численного моделирования, как эффективного средства для описания термо-гидродинамических процессов в ней. В данной работе именно результаты скважинных измерений температуры и давления сравниваются с расчетными, что обеспечивает в перспективе построение моделей, адекватно описывающих сложные физические процессы в

литосфере.

Актуальность. Началом научных исследований потоков жидкостей в подземной гидросфере можно считать работы А. Дарси [I]. Позже первые гидродинамические модели фильтрации жидкостей в пористых средах были построены М. Маскетом и Л.С. Лейбензоном. Выдающийся вклад внесли отечественные ученые: академик С.А. Христианович, Б.Б. Лапук, И.А. Чарный, В.Н.Щелкачев. В области термодинамических скважинных исследований процессов в литосфере отправной точкой следует считать работу К. Кунца и М. Тиксье, на основе которой Э.Б. Чекалюком [II] была разработана методика определения продуктивности разреза по термограмме. Им же было получено уравнение сохранения энергии для фильтрации сжимаемой жидкости в пористой среде с учетом термодинамических эффектов, которое легло в основу практически всех дальнейших исследований. Многие теоретические вопросы расчета термогидродинамических процессов течения жидкостей и газов в пластах, а также вопросы, связанные с прикладными задачами разработки месторождений жидких углеводородов развивались в работах Баренблатта Г.И., Басниева К.С., Боксермана А.А., Бузинова С.Н., Дияшева Р.Н., Ентова В.М., Желтова Ю.П., Закирова С.Н., Кочиной И.Н., Мирзаджанзаде А.Х., Нигматуллина Р.И., Николаевского В.Н., Полубариновой-Кочиной П.Я., Теслюка Е.В., Розенберга М.Д., Умрихина И.Д., Хасанова М.М. и др.

В настоящее время исследователями решаются новые задачи теории фильтрации, учитывающие нелинейные и релаксационные свойства сред, термодинамику пластовых систем, деформации коллекторов, особенности тепломассопереноса в земной коре, состоящей из сложных геологических структур, и вопросы связи приповерхностных и глубинных процессов [III,IV]. И здесь еще имеется большое количество нерешенных задач.

В последние годы в связи с развитием мощности компьютеров значительно возросли возможности моделирования динамики сложных систем, в том числе при построении реалистичных моделей фильтрационных потоков подземной гидросферы в пористых и трещиновато-пористых коллекторах. Широкое

вовлечение в разработку трещиновато-пористых коллекторов поставило вопросы, связанные с изучением структуры этих коллекторов, особенностей фильтрации в них и поиском новых способов управления потоками флюидов.

Результаты численного моделирования как основного метода данного диссертационного исследования в области нестационарных неравновесных термогидродинамических потоков в неоднородных пористых и трещиновато-пористых средах и тепломассопереноса в земной коре, интересны с позиции комплексного теоретического изучения явлений переноса в подземной гидросфере, а также весьма важны для решения практических задач прогнозирования явлений в атмосфере и гидросфере, разработки месторождений углеводородного сырья и осуществления экологического мониторинга. При этом представляется важным совместное рассмотрение гидродинамических и термодинамических процессов в литосфере. Каким образом связаны поля давлений в пластах и поля деформаций? В какой степени конвекционные течения в верхней мантии определяют распределение тепловых полей в приповерхностной толще? Какова взаимосвязь современных вертикальных движений земной коры и тепловых полей? Каким образом эти процессы связаны с атмосферными явлениями? Решение подобных задач невозможно без компьютерного моделирования. Практическая цель, которая при этом преследуется, – разработка методов для расчетов полей давлений, температур и параметров, характеризующих исследуемые среды. Решению данных актуальных проблем и посвящена диссертационная работа.

Целью работы является изучение физических процессов, происходящих в результате разработки ресурсов подземной гидросферы и естественной фильтрации приповерхностных вод, тепломассопереноса в системе флюидонасыщенный пласт-скважина, формирования температурных полей в верхних слоях литосферы при наличии неоднородных геологических структур и вертикальных движений земной коры и взаимосвязей этих процессов с использованием численных моделей.

Задачи исследования. Создание модели, адекватно описывающей фильтрацию

в трещиновато-пористых средах на нестационарных режимах, разработка метода верификации фильтрационных моделей по данным исследований в скважинных условиях, оценка времен релаксации, получение спектра функции массопереноса в системе трещины-блоки, разработка и обоснование методов оценки неоднородностей пласта, определения интервалов внедрения флюидов, создание моделей для совместного рассмотрения фильтрационных, деформационных и тепловых процессов в верхней литосфере и методов для расчетов полей давлений, деформаций и температур.

Научная новизна. Методами компьютерного моделирования впервые исследованы различные виды кривых восстановления давления в условиях неравновесной фильтрации в трещиновато-пористом пласте при наличии неоднородностей и выявлено влияние каждого из релаксационных параметров; впервые исследованы амплитудо- и фазо-частотные характеристики трещиновато-пористой среды при неравновесности процесса фильтрации; осуществлено комплексное использование данных о различных физических полях (давлений, температур, деформаций) для контроля за гидродинамическими потоками и определения неоднородностей; выявлены различия в процессе восстановления температуры в слоистых средах с различными теплофизическими свойствами и в интервалах скопления флюида; построены оригинальные модели, описывающие перераспределение температуры при наличии структурных образований в литосфере, а также учитывающие современные вертикальные движения земной коры.

Таким образом, материалы, изложенные в диссертации представляют собой существенный **вклад в решение важной проблемы** описания гидродинамических, тепловых и деформационных процессов во флюидонасыщенных пористых средах подземной гидросферы и их взаимодействии с породами литосферы.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов следует из того, что они основаны на общих законах и уравнениях механики сплошных сред, обеспечиваются строгими математическими выводами,

выбором корректных численных методов, сопоставлением решений, полученных разными методами, качественным и количественным совпадением модельных результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Научная значимость. Результаты исследования расширяют и углубляют теоретические знания о неравновесной фильтрации жидкостей в трещиновато-пористых средах, описываемых феноменологическими моделями; связанных с фильтрацией флюидов термодинамических процессах в подземной гидросфере и перераспределении тепловых потоков в верхней литосфере.

Практическая ценность работы заключается в разработке моделей нестационарных процессов в насыщенных флюидами, неоднородных пористых средах, методов оптимизации разработки трещиновато-пористых пластов.

Ряд способов исследования и определения параметров пластов и скважин защищен авторскими свидетельствами и патентами:

- способ обнаружения техногенных скоплений флюидов в геологических объектах, вскрытых скважиной (патент № 2013533); способ извлечения нефти из трещиновато пористого пласта (патент № 2109130); способ разработки нефтяных месторождений в условиях заводнения (патент № 2166069); способ определения распределения давления и границ неоднородностей пласта (патент № 2188320).

За создание работы «Технология исследования нагнетательных скважин по обнаружению перетоков и мест загрязнения недр закачиваемыми водами на ранних стадиях развития» автор диссертационной работы совместно с соавторами стал лауреатом Фирменной премии АО «Татнефть» 1998 г.

Программы расчета давления в нестационарных процессах, зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ, могут быть использованы при контроле за разработкой месторождений.

Расчетные методики, созданные автором применялись при выполнении работ сотрудниками Казанского госуниверситета на месторождениях РТ, Пермской, Оренбургской областей и на Совхозном подземном хранилище газа. Результаты

использовались при выполнении более 15 хозяйственных договоров, грантов АН РТ №№ 08-8.3-202/2005 Ф (08) № 08-8.2-24/2006(Г), № 08-8.2-13/2006 (Г)

Апробация работы Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях Казанского госуниверситета, международном симпозиуме «Тепловая эволюция литосферы и ее связь с глубинными процессами» (Москва, 1989), международной конференции «Разработка газоконденатных месторождений» (Краснодар, 1990), международной конференции «Проблемы комплексного освоения трудноизвлекаемых запасов нефти и природных битумов» (Казань, 1994), международной конференции "Геометризация физики II" (Казань, 1995), всероссийской научно-технической конференции "Химия, технология и экология переработки природного газа" (Москва, 1996), XIV Губкинских чтениях (Москва, 1996), международной геофизической конференции. и выставки (Москва, 1997), . научно-практической конференции "Приоритетные методы увеличения нефтеотдачи пластов и роль супертехнологий" (Бугульма, 1997), XXII Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (Вена, 1997), XXIII Генеральной ассамблее Европейского геофизического общества (Ницца, 1998), международной конференции «The earth's thermal field and related research methods» (Москва, 1998), международной конференции «Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов. Проблемы их освоения» (Казань, 2005), семинаре главных геологов ОАО «Татнефть» (Заинск, 2005), международной конференции «Повышение нефтеотдачи пластов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений и комплексное освоение высоковязких нефтей и природных битумов» (Казань, 2007).

Вклад автора выражается в математической постановке задач о распределении температуры в системе пласт-скважина, в интервалах скопления флюидов, о перераспределении теплового потока геологическими структурами; выборе моделей, их численной реализации и тестировании

расчетных методик, обработке и анализе экспериментального материала (за исключением теплового поля Предкавказской ячейки и профиля теплового потока Московская синеклиза-Кавказ); оценке значений релаксационных параметров, численном обосновании связи модельных временных параметров с интенсивностью дебитов перетоков в системе блоки-трещины, использовании временной зависимости эффективного коэффициента Джоуля-Томсона для оценки особенностей фильтрационного течения.

Публикации. Всего по теме диссертации автором опубликована 51 работа, в том числе 3 монографии, 8 статей в периодических научных журналах, 5 статей в трудах международных и всероссийских конференций, получено 7 патентов и авторских свидетельств СССР и РФ, 3 Свидетельства РОСАПО. Общий объем опубликованных работ составляет 750 страниц, 32 работы написаны с соавторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 271 страницу текста, включая 146 рисунков, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка обозначений, Приложения и списка литературы из 263 наименований.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования фильтрации жидкостей в трещиновато-пористых пластах по неравновесному закону. Роль релаксационных параметров и способы оценки этих параметров.
2. Результаты анализа нестационарного массообмена в системе блоки-трещины.
3. Метод оценки неоднородностей в распределениях гидродинамических параметров по результатам анализа кривых восстановления давления, температуры и временной зависимости значений эффективного коэффициента Джоуля-Томсона.
4. Метод интерпретации термограмм, зарегистрированных в процессе восстановления температуры в слоистых толщах, включающих интервалы возможных техногенных скоплений флюидов, разработанный на основе

численной неизотермической модели вторжения флюида в коллектор.

5. Результаты расчетов и анализа полей деформаций горных пород в условиях нестационарной фильтрации и температурных полей в трехмерных геологических структурах, в том числе с учетом современных вертикальных движений земной коры.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, отмечен личный вклад автора в решение поставленных задач, приводятся краткое содержание и характеристика работы, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит вводно-обзорный характер. В разделе 1 анализируются основные параметры процессов, происходящих в подземной гидросфере и литосфере в контексте материалов диссертационной работы. В задачах фильтрации преимущественно рассматривается интервал глубин 0-5 км от поверхности земли, на котором температура меняется в пределах 10-100 °С, а давления флюидов в пластах – до 60 МПа. Обсуждается трещиноватость земной коры, иерархия систем трещин, которые служат каналами связи между глубинными процессами и поверхностью земли. Латеральные гидродинамические потоки обычно приводят к локальным деформациям поверхности (до десятков км), а тепловые потоки – как к локальным, так и глобальным (сотни и тысячи км).

Во втором разделе рассматриваются вопросы подземной гидродинамики, при этом упор делается на фильтрацию жидкостей в широко распространенных в природе трещиновато-пористых средах (Г.И.Баренблатт, Ю.П.Желтов, Кочина И.Н., Д. Уоррен, П. Рут). Трещиновато-пористые коллекторы можно отнести к «неравномерной» по структуре строения среде, они состоят из пористых блоков, связанных между собой системой трещин. Считается, что объем пустот пористых блоков намного превышает объем трещин, поэтому жидкость в основном находится в блоках, гидропроводность трещин

значительно превышает гидропроводность блоков, в результате чего, фильтрация осуществляется в основном по трещинам. Кроме того, предполагается, что в элементарном объеме достаточно полно представлены как поры, так и трещины, т.е. среда является двупоровой и в каждой точке представлены два давления, две проницаемости, две пористости.

Неустановившаяся плоско-радиальная фильтрация в описанной среде описывается системой уравнений [1]

$$\begin{aligned} w_1 &= -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial r}, \quad w_2 = 0, \\ \frac{\rho_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r w_1) + \frac{\partial}{\partial t} (m_1 \rho) - q &= 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} (m_2 \rho) + q = 0, \\ m_1 \rho &= m_{10} \rho_0 + \rho_0 \beta_1 (p_1 - p_{10}), \\ m_2 \rho &= m_{20} \rho_0 + \rho_0 \beta_2 (p_2 - p_{20}), \\ q &= \alpha \frac{\rho_0 k_2}{\mu l^2} (p_2 - p_1) = \rho_0 A (p_2 - p_1). \quad A = \alpha \frac{k_2}{\mu l^2} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь p - давление, r - радиальная координата, t - время, w_i - скорость фильтрации (здесь всюду индекс 1 относится к трещинам, 2 - к блокам), A - коэффициент обмена жидкостью между блоками и трещинами, β_i - упругоёмкость (сжимаемость), $\kappa_1 = k_1 / \mu \beta_1$ коэффициент пьезопроводности трещин, учитывающий их упругоёмкость, m_i - пористость, k_i - проницаемость, μ - вязкость жидкости, l - характерный размер блока, α - безразмерный параметр, определяемый свойствами среды.

Вопрос выбора фильтрационной модели является важнейшим при описании процессов в подземной гидросфере.

С учетом неравновестности уравнение для давления в трещинах (уравнение пьезопроводности) можно записать в виде [1]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(p + (\tau_w + \tau') \frac{\partial p}{\partial t} + \tau_w \tau' \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) = \frac{\kappa_1 \tau'}{\tau_2} \Delta \left(p + (\tau_p + \tau_2) \frac{\partial p}{\partial t} + \tau_p \tau_2 \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right), \quad (2)$$

где $\tau_1 = \beta_1 / A$, $\tau_2 = \beta_2 / A$, $\tau' = \tau_1 \tau_2 / (\tau_1 + \tau_2)$ - постоянные размерности времени, связанные с упругими свойствами рассматриваемой среды (упругоёмкостями

трещин и блоков), τ_w , τ_p - времена релаксации скорости потока и давления – феноменологические временные параметры, отражающие неравновесный характер связи изменения скорости фильтрации и давления

Математические модели, включающие времена релаксации, являются системами с «памятью», в смысле зависимости значений термодинамических величин от всей предыстории процесса, а не только моментальных значений и являются объектом исследований расширенной необратимой термодинамики [V]. Так, решение задачи об изменении давления в скважине (кривой восстановления давления) долгое время работавшей с постоянным расходом Q_0 после ее остановки для модели (2) с двумя временами релаксации имеет вид

$$\Delta p(t) = \frac{\mu Q_0}{4\pi k h} \frac{\tau_w}{\tau_p} \ln\left(\frac{4\kappa t}{r_c^2} \frac{\gamma + \tau_p}{\gamma + \tau_w}\right) + \frac{\mu Q_0}{4\pi k h} \left(1 - \frac{\tau_w}{\tau_p}\right) \int_0^t \ln\left(\frac{4\kappa t'}{r_c^2} \frac{\gamma' + \tau_p}{\gamma' + \tau_w}\right) \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_p}\right) \frac{dt'}{\tau_p}. \quad (3)$$

Здесь h – толщина пласта, γ - постоянная Эйлера, r_c - приведенный радиус скважины.

В третьем разделе рассмотрены вопросы тепломассопереноса в пористых средах и других породах литосферы. Здесь актуально исследование температурных изменений в породах и давления фильтрующихся жидкостей. Соответствующая система уравнений для пласта записывается в виде [3]

$$\begin{aligned} m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho w) &= 0, \quad -\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho |w| w, \\ c_n \frac{\partial T}{\partial t} &= c_p (-\rho w) \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial r} \right) + c_p \rho m \eta \frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь T - температура, m – пористость, w - скорость фильтрации, ε - коэффициент Джоуля-Томсона, η - коэффициент адиабатического сжатия (расширения) флюида, c_p , c_n - коэффициенты теплоемкости флюида и пласта, λ_n - коэффициент теплопроводности пласта.

При исследованиях тепловых возмущений в литосфере установлено, что вид кривой восстановления температуры (КВТ), измеряемой в скважине при прекращении действия теплового возмущения, различен для интервалов поглощения флюидов и непроницаемых плотных пород. Для последних

зависимость изменений температуры от времени в полулогарифмических координатах представляет прямую. Для приближенного расчета температуры пород можно использовать соотношение, полученное Саламатиным А.Н. [VI]

$$\frac{T(t) - T_n}{T_0 - T_n} = 1 - \frac{1}{2 \ln(1 + \sqrt{\pi a(t_0 + t) / r_c})} \left(\ln \frac{8at}{r_c^2} - 1 \right) \quad (5)$$

здесь T_0 – температура в скважине в момент прекращения теплового воздействия (остановка скважины); T_n – температура пород на данном срезе до начала возмущения; T – текущая температура в момент времени t после остановки; t_0 – длительность теплового возмущения (закачки или добычи), a – коэффициент температуропроводности пород.

В четвертом разделе обсуждаются вопросы совместного рассмотрения тепловых, фильтрационных и деформационных процессов [IV] с использованием классического уравнения теплопроводности вкупе с вертикальными смещениями в литосфере и смещений и деформаций горных пород, вызванных переменным давлением в насыщенных пластах. В рассматриваемом подходе для произвольных z вертикальная компонента смещения u_z имеет вид

$$u_z(z) = \frac{1 + \sigma}{E} \int_0^\infty \xi J_0(\xi, r) \left[e^{\xi z} \{ 2(1 - \sigma)(1 + 2H\xi) + 2H^2 \xi^2 - z\xi(1 + 2H\xi) \} e^{-2H\xi} + e^{-\xi z} \{ 2(1 - \sigma) + z\xi \} \right] \frac{HP(\xi, t)}{a_0 + \xi H f(\xi)} d\xi, \quad (6)$$

$$a = \frac{4(1 - \sigma^2)HE_n}{Eh}, \quad f(\xi) = 1 - (1 + 2H\xi + 2H^2 \xi^2) \exp(-2H\xi).$$

Здесь – E и E_n – модули Юнга горных пород и пласта, H – глубина залегания пласта, σ – коэффициент Пуассона пород, $P(\xi, t)$ – вспомогательная функция, связанная с распределением давления в пласте, определяемая условиями конкретной задачи.

Также приводится постановка задачи о вариациях теплового потока вызванных вертикальными смещениями литосферы, в следующей постановке (постановка Чугунова В.А.):

$$c(z) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(z) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} - V(x, y) \frac{\partial T}{\partial z},$$

$$z = 0, \quad t = 0,$$

$$z = H, \quad T = f(x, y),$$
(7)

здесь T - температура, c , λ - коэффициенты теплоемкости и теплопроводности, V - скорость вертикального движения, z -вертикальная координата, H - нижняя граница литосферы.

Во второй главе рассматриваются задачи, связанные с изменением давления в пластах при использовании различных модификаций уравнения пьезопроводности в неравновесной форме (2) для описания нестационарного процесса.

Отметим, что кривые восстановления давления в трещиновато-пористых коллекторах могут иметь сложный вид (рис.1) и задача интерпретации здесь весьма актуальна. Характерные свойства течения в трещиновато-пористой среде проявляются только на нестационарных режимах.

Метод кривых восстановления давления (КВД) является одним из способов зондирования пласта и позволяет получить информацию о фильтрационных параметрах, прежде всего о гидропроводности. Для неоднородных коллекторов разработан метод оценки неоднородностей по данным кривых восстановления давления. Действительно, при описании натурных экспериментов существенно влияние зональных неоднородностей с масштабами 10-1000 м, время регистрации проявления которых и, следовательно, примерное местоположение можно оценивать по результатам исследований изменений значений «мгновенной» (динамической) гидропроводности (наклонам графиков КВД в текущий момент), другими словами, исследуя тенденции изменения гидропроводности (рис.2). Особую сложность здесь может вызвать определение параметров самой ближней к скважине зоны пласта.

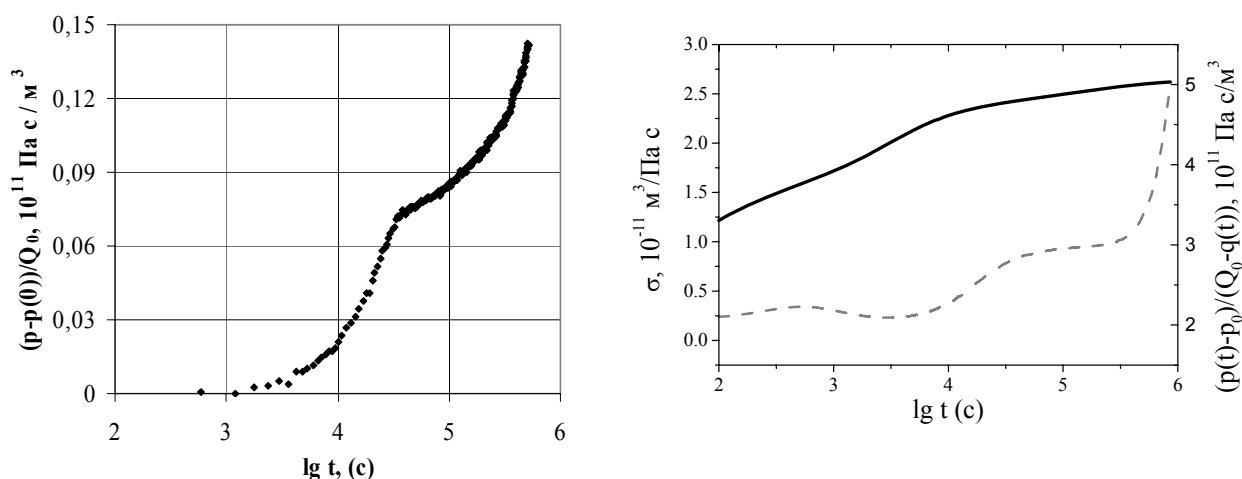


Рис. 1. Кривая восстановления давления скважины Архангельского месторождения.

Рис.2. Кривая восстановления давления (сплошная) и динамическая гидропроводность (пунктирная) в пласте с ухудшенной призабойной зоной ($\tau_2=1000$ с, $\tau'=300$ с).

В главе методом решения прямых задач проведено исследование роли и вклада отдельных временных феноменологических параметров в форму линий кривых восстановления давления, предложены способы оценки их значений. Полученные данные предназначены для последующего моделирования полей давления в пластах.

В первом разделе рассматриваются решения уравнения (2) для случая $\tau_1 \neq 0$, $\tau_2 \neq 0$, $\tau_p = 0$, $\tau_w = 0$ (трещиновато-пористая среда без учета неравновесного характера фильтрации). Кривые восстановления давления, полученные из решения системы (1) имеют два линейных участка на больших и малых временах. С уменьшением τ' (увеличением разницы между упругостями трещинного и блокового пространств), величина первого линейного участка сокращается. Для реальных кривых восстановления давления, на временах наблюдения от десятков секунд, характерно отсутствие первого линейного участка, что, возможно, свидетельствует о малой упругости трещин.

Первоначальные участки реальных кривых представляют собой период относительно слабого изменения давления и имеют длительность 10^3 - 10^4 секунд (рис.1). Увеличение продолжительности первоначального участка наблюдается при росте приведенного радиуса скважины и уменьшении пьезопроводности пласта, увеличении гидропроводности призабойной зоны и наличии послепритока $q(t)$ из пласта. В случае наличия притока $q(t)$ обработка кривых восстановления давления весьма удовлетворительна в координатах $[lg t, (p-p_0)/(Q_0-q(t))]$.

Отметим, что в случае нелинейной фильтрации в условиях, прежде всего, зависимости проницаемости от давления, что проявляется в трещиновато-пористых средах при больших перепадах давлений, кривая падения давления не будет совпадать с кривой восстановления давления и этот признак должен быть учтен при интерпретации.

Во втором разделе рассматриваются решения (2) для случая $\tau_1=0$, $\tau_2=0$, $\tau_p \neq 0$, $\tau_w \neq 0$ (пористая среда с релаксационными эффектами). Выявлено, что при представлении кривой восстановления давления, состоящей условно из трех участков, значение феноменологического параметра τ_p может быть оценено как время, соответствующее середине второго участка. Релаксационный эффект, определяемый параметром τ_p , отражается в смещении линии КВД в сторону больших времен и запаздывании проявления неоднородностей на графике гидропроводности. Он также не позволяет определять значения гидродинамических параметров ближней к скважине области с достаточной точностью. В разделе подробно рассматриваются и анализируются различные ситуации, реализуемые на практике, связанные с наличием послепритока, неоднородностью пласта, зависимостью проницаемости от давления.

В третьем разделе рассматривается общий случай: $\tau_1 \neq 0$, $\tau_2 \neq 0$, $\tau_p \neq 0$, $\tau_w \neq 0$: трещиновато-пористая среда с релаксационными свойствами. Показано, что учет неравновесности фильтрации приближает вид модельных кривых восстановления давления в трещиновато-пористых пластах к реальным (рис.3).

При этом величина τ_p сказывается на малых, а соотношение упругоэластичностей трещин и блоков (τ', τ_2) – на больших временах наблюдения. Для исследованных ситуаций из сопоставления с экспериментальными кривыми восстановления давления порядок значений временных параметров τ_p, τ_2 может быть оценен как $10^3 - 10^4$ с.

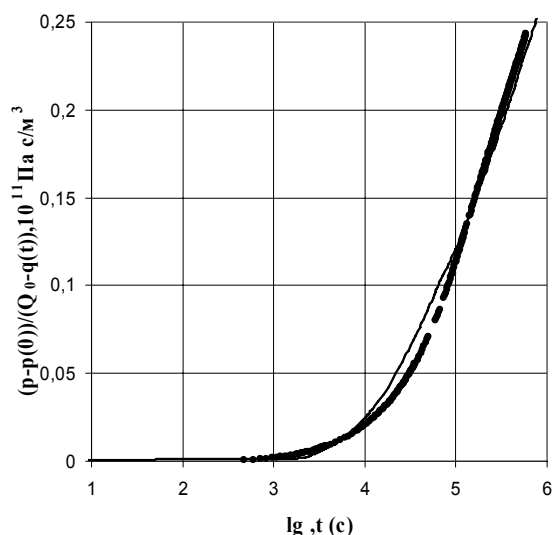


Рис. 3. Кривая восстановления давления скважины Архангельского месторождения (точки - экспериментальные данные, линия – модельная кривая).

Полученные результаты позволяют рассчитывать значения гидропроводностей и оценивать значения пьезопроводностей пластов по результатам проведения натурных гидродинамических исследований, что актуально для моделирования полей давлений в трещиновато-пористых коллекторах.

В третьей главе рассмотрены вопросы массообмена флюидов в системе блоки-трещины.

В первом разделе обсуждается актуальный вопрос оценки эффективных размеров блоков, приводятся результаты моделирования трещинно-блоковых

структур. Оказалось, что размеры блоков могут на порядок превышать средний размер отдельной трещины.

Во втором разделе исследуется процесс перераспределения жидкости в системе блоки-трещины для задачи о пуске скважины с постоянным расходом Q_0 . Здесь функцию удельного расхода можно рассчитать по формуле, полученной с помощью интегрального преобразования Лапласа-Карсона

$$q(r, t) = \rho_0 A \tau_2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu Q_0}{2\pi k_1 h} \frac{\gamma + \tau_w}{\gamma + \tau_p} \frac{\gamma}{\gamma + \tau_2} \frac{R(t)}{r_c} \frac{BesselK_0(r/R(t))}{BesselK_1(r_c/R(t))} \right),$$

$$R = \sqrt{\frac{\kappa_1 \tau' \gamma (\gamma + \tau_2) (\gamma + \tau_p)}{\tau_2 (\gamma + \tau') (\lambda t + \tau_w)}}. \quad (8)$$

Как показывают расчеты, по истечении времени равного значению τ_2 , массообмен между блоками и трещинами оставляет значительную величину: десятки процентов от первоначального в прискважинной зоне и более на удалении. Проводится анализ влияния различных параметров на интенсивность массообмена.

В разделе 3 рассматривается обмен жидкостью между блоками и трещинами при периодическом зондировании пласта.

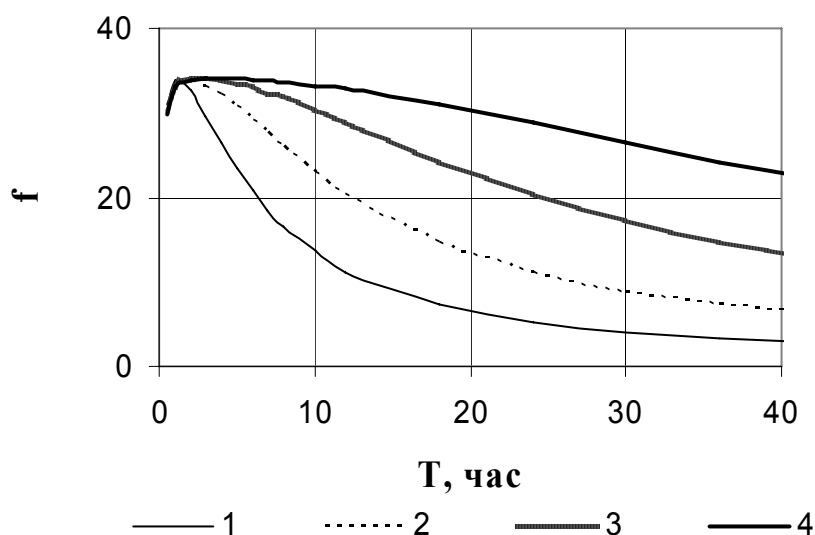


Рис.4. Безразмерная величина массообмена между блоками и трещинами в зависимости от периода циклического воздействия; 1- $\tau_2=1800$ с, 2- $\tau_2=3600$ с, 3- $\tau_2=7200$ с, 4- $\tau_2=14400$ с.

Для анализа массообмена между блоками и трещинами при периодическом гидродинамическом воздействии на пласт [1,2] можно использовать соотношение

$$q(r,t) = \rho_0 A P_c \operatorname{Re} \left[\frac{i \omega \tau_2}{1 + i \omega \tau_2} \frac{\operatorname{Bessel} K_0(r / R(\omega))}{\operatorname{Bessel} K_0(r_c / R(\omega))} \exp(i(\omega t + \delta + \pi)) \right]. \quad (9)$$

Здесь

$$R(\omega) = \left[\frac{\kappa_1 \tau' (1 + i \omega \tau_2) (1 + i \omega \tau_p)}{i \omega \tau_2 (1 + i \omega \tau') (1 + i \omega \tau_w)} \right]^{1/2}, \quad P_c - \text{амплитуда колебаний давления на}$$

скважине, δ - сдвиг фаз между дебитом и давлением на ней.

Как показывают проведенные расчеты, для каждой точки в пласте массообмен между блоками и трещинами в зависимости от периода воздействия имеет максимум. Значение периода, соответствующего максимуму, его можно называть оптимальным периодом, находится в прямой зависимости, прежде всего, от параметра τ_2 . Причем с увеличением τ_2 увеличивается и ширина интервала периодов, обеспечивающих максимальный обмен (рис.4). С удалением от скважины длительность оптимальных периодов возрастает.

В четвертом разделе приводятся результаты использования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) - $|F(j\omega)| = \frac{|A_Q(j\omega)|}{|A_P(j\omega)|} = \frac{A_Q}{A_P}$; и - фазо-частотных

характеристик - $\varphi(\omega) = \varphi_Q - \varphi_P$ (ФЧХ) системы для решения задачи идентификации линейной фильтрационной модели, а также методика использования диаграмм Найквиста для анализа исследуемого периодического процесса (здесь A_Q, A_P - амплитуды, φ_Q, φ_P - фазы сигналов по расходу и давлению в скважине). Действительно, в рамках концепции линейного отклика передаточную функцию любой сложной системы можно представить в виде произведения передаточных функций простых подсистем, если их соединить последовательно. При задании периодических колебаний давления на скважине комплексная передаточная функция для (2) будет выглядеть для

установившихся режимов как

$$F(i\omega) = 2\pi\sigma_1 \sqrt{\frac{r_c^2}{\kappa_1}} \omega \exp(i(\pi/4 + k\pi)) \sqrt{\frac{\tau_2 \sqrt{1 + \omega^2 \tau'^2}}{\tau' \sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2}}} \exp(0.5i(\arctg \omega \tau' - \arctg \omega \tau_2)) * \\ \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_p^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_w^2}}} \exp(0.5i(\arctg \omega \tau_p - \arctg \omega \tau_w)). \quad (10)$$

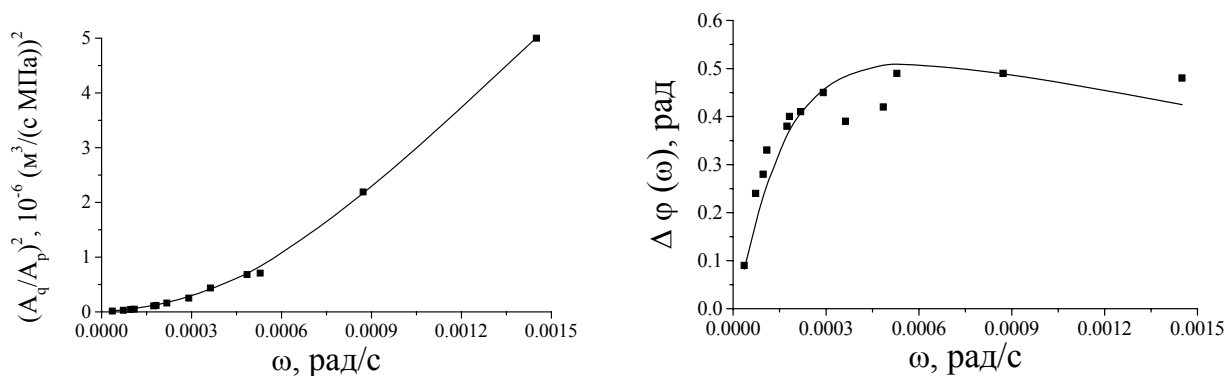


Рис. 5. Пример амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик пласта (точки - экспериментальные данные, линии - расчетные).

Модельные АЧХ и ФЧХ аналогичны характеристикам карбонатных коллекторов, полученным экспериментально [2] (рис.5), что свидетельствует о правомерности описания трещиновато-пористых коллекторов используемой моделью. Частотные характеристики могут быть использованы для оценки временных и гидродинамических параметров. Приведенный подход является не только радиофизическим взглядом на рассматриваемую проблему, но и используется для подбора адекватных значений временных параметров для реальных систем.

Таким образом, разработан ряд вычислительных алгоритмов для численного исследования нестационарных процессов в насыщенных флюидами, неоднородных, сложных по реологии пористых средах с учетом релаксационных эффектов, и соответствующий набор компьютерных программ, позволяющих как описывать указанные процессы, в том числе на неустановившихся режимах, так и рассчитывать гидродинамические

параметры.

В четвертой главе представлены результаты комплексного исследования полей давления и температуры в пористых пластах, методика соотнесения значений температуры и давления, использующая понятие эффективного коэффициента Джоуля-Томсона. Действительно, помимо поля давлений, значимую информацию о термогидродинамических процессах несет поле температур. Оно содержит информацию не только о теплофизических процессах, но и о гидродинамических, и может служить прекрасным дополнением к полю давлений. Полученные результаты позволяют совместно рассматривать параметры, описывающие термодинамические и гидродинамические процессы, прежде всего для выявления местоположений неоднородностей в распределении гидродинамических параметров.

В разделе 1 рассматривается распределение температуры на квазистационарном режиме, вводится понятие эффективного коэффициента Джоуля-Томсона (ЭКДТ) как проявление связи гидродинамических и теплофизических процессов в пористых средах $\varepsilon_{эф} = \frac{T_{см} - T_{Г}}{p_{к} - p_{з}}$ [3], где $T_{см}$ - температура смеси газа из пласта, $T_{Г}$ - геотермическая температура на уровне кровли пласта, $p_{к}$ - давление на контуре питания пласта, $p_{з}$ - давление на забое, возможности его определения и практического применения для определения давления в пласте, оценки проницаемости пласта.

В разделе 2 анализируются нестационарные процессы. Коэффициент Джоуля-Томсона предлагается использовать для пересчета кривой изменения температур в расчетную кривую изменения давления, отличающуюся от, собственно, кривой изменения давления. Оказывается, что график гидропроводности, рассчитанный по пересчитанной кривой изменения давления (рис.6) подробнее отражает распределение параметров, неоднородности и особенности фильтрационных потоков в ближней к скважине области, тем самым дополняя результаты исследований, получаемые

из рассмотрения изменения давления во времени. Исследовано соответствие значений гидропроводности пласта по простиранию и изменения во времени эффективного коэффициента Джоуля-Томсона.

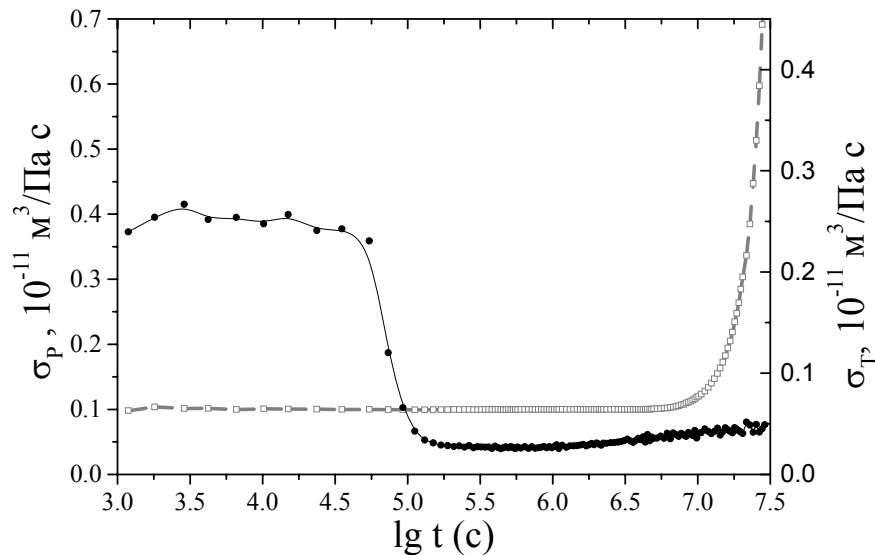


Рис. 6. Динамическая гидропроводность: пунктирная определенная из изменения давления, сплошная - из изменения температуры (задано скачкообразное изменение проницаемости пласта на $r^*=5$ м).

В разделе 3 излагаются возможности использования исследований температурных полей для контроля за гидродинамическими потоками, например, в случае вторжения загрязнений в водоносные пласты, образования техногенных скоплений углеводородов и для осуществления мониторинга приповерхностных толщ литосферы. Вопрос о техногенных скоплениях остро стоит, в частности, на подземных хранилищах газов (ПХГ).

Вторжение в коллектор флюида с температурой, отличной от окружающих пород, искажает невозмущенное температурное поле. Однако по скважине, в которой можно было бы произвести измерение температуры, идет поток, вносящий дополнительные возмущения в температурное поле. Для регистрации температуры используются кратковременные остановки скважины. В реальных

условиях для определения t_0 (см. (5)) используется результаты восстановления температуры по слою пород, заведомо не содержащему коллекторы (соли, глины), невозмущенная температура которого известна. Для реализации предлагаемого метода необходимо зарегистрировать не менее 3 термограмм по глубине на нестационарных режимах. На основе моделирования процесса восстановления температуры определяется время записи каждой из термограмм с целью обеспечения наибольшей точности расчета температуры пород при условии сокращения времени остановки скважины. Отклонение расчетной температуры от невозмущенной геотермы сверх указанной точности определяет места поглощения. Метод был реализован на Совхозном ПХГ, нефтяных месторождениях Татарии и Пермской области. На способ получен патент РФ № 2013533. Приводятся примеры реализации метода (рис.7).

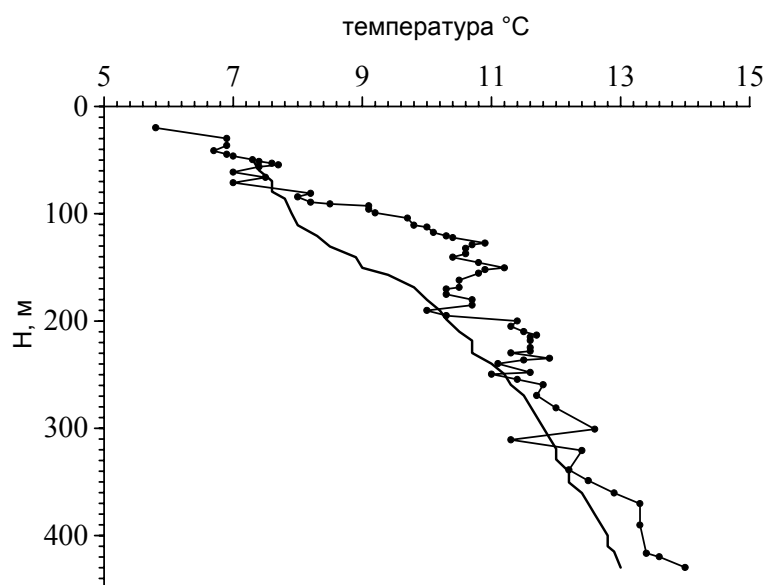


Рис.7. Расчетная температура пород (линия с точками) и невозмущенная геотерма (сплошная) скважины Ромашкинского месторождения (интервал скопления в районе 125 м).

Метод адаптирован и для случая периодической эксплуатации скважин. Особо сложным является случай расположения интервала поглощения в

слоистой толще с различными теплофизическими параметрами и незначительного объема поглощения, что затрудняет выделение интервала поглощения по термограммам (рис.8). Определен ряд дополнительных критериев: вид кривой восстановления температуры и расчетные значения температуропроводности, позволяющих разделить влияние на процесс восстановления температур после остановки скважины различия теплофизических свойств пород при слоистом строении толщ и температурных аномалий, вызванных собственно поглощением жидкостей.

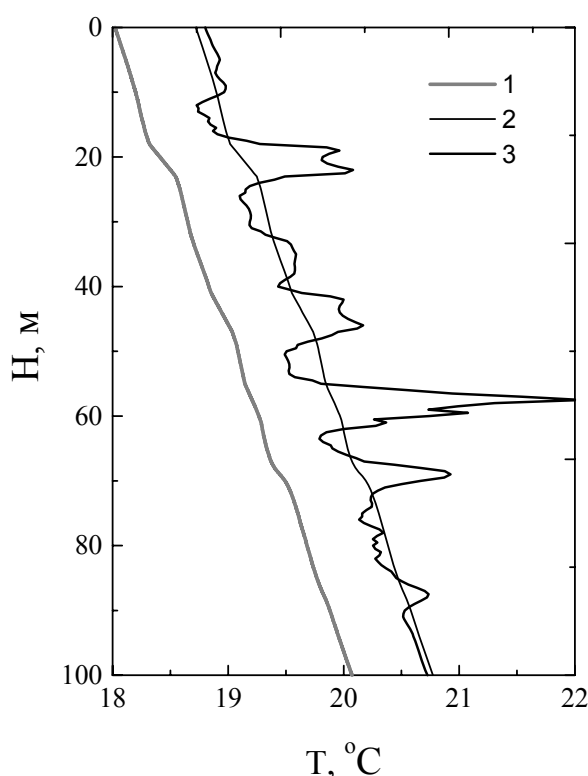


Рис.8. Термограммы после остановки скважины, цифры соответствуют времени после остановки скважины в часах (поглощающий интервал 57.5-60 м).

Рассматриваемая методика применяется для интерпретации кривой восстановления температуры пород, имеющей аномалии значений адиабатического расширения газа по пластам, не дренируемым данной скважиной. Продemonстрировано хорошее совпадение исходной и расчетной температур.

Разработанная численная модель процесса внедрения флюида позволяет

для конкретных условий месторождения определить набор времен измерений, достаточных для идентификации интервалов внедрения в коллектор флюида с температурой, отличной от первоначальной температуры пород, локализовать местоположения внедрений и детально исследовать области техногенного скопления флюида, раннее диагностирование которых обеспечивает экологическую безопасность в областях интенсивного антропогенного воздействия.

В пятой главе рассматривается связь полей смещений и деформаций с полями давления и фильтрационных потоков; вариаций тепловых полей с современными вертикальными движениями земной коры; температурные поля в литосфере в условиях существования неоднородных геологических структур.

Раздел 1 посвящен исследованиям деформаций и смещений земной поверхности, вызванных гидродинамическим воздействием на пористые и трещиновато-пористые пласты с использованием аналитических соотношений типа (6). Для расчета смещений выполнены численные расчеты соответствующих интегралов (рис.9). Разработан метод оценки местоположения неоднородностей в пласте, использующий анализ пространственных производных кривых смещений (рис.10).

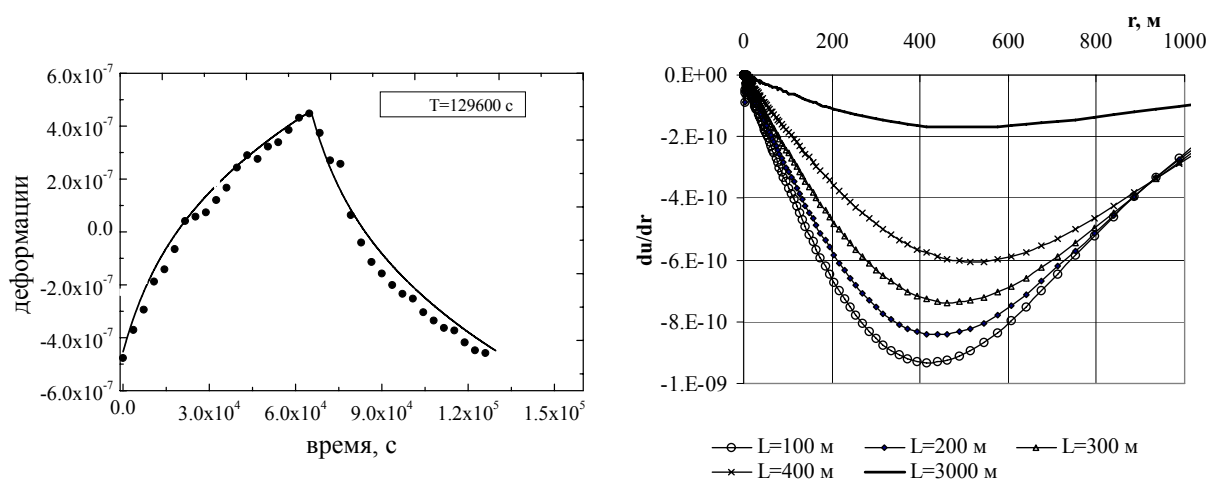


Рис.9. Сравнение расчетных и экспериментальных значений деформаций.

Рис.10. Производная от смещения по расстоянию в зависимости от местоположения границы неоднородности.

Раздел 2. Рассматривается задача корреляции современных вертикальных движений земной коры с макромасштабными тепловыми потоками в ней (7). В модели земная кора (в связи с неопределенностью параметров глубинных слоев) разбивается на два слоя. В стационарном случае температура верхнего слоя равна

$$t_1(x, z) = \frac{q_0}{\lambda_1} (H - z) \left(1 + \frac{5 K_a K_\lambda (1 + 3 K_\delta) \omega(x)}{(\delta + K_\lambda (1 - \delta))(1 + 5 K_\delta + K_\delta^2)} \right) + B, \quad (11)$$

где ω определяется из

$$\omega'' - 10 K_L^2 A \omega = -Pe(x) K_L^2,$$

$$\begin{aligned} K_L &= \frac{2L}{H}; \quad X = \frac{x}{2L}; \quad Pe = \frac{V(x)H}{a_1}; \quad K_\delta = \frac{\delta}{\delta + K_\lambda (1 - \delta)}; \\ K_a &= \frac{a_1}{a_2}; \quad \delta = \frac{h}{H}; \quad A = \frac{1 + 3 K_\delta + 1.5 Pe(x) K_a (1 - \delta) K_\delta^2}{(1 - \delta)(1 + 5 K_\delta + 10 K_\delta^2)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь индекс 1 - относится к верхнему, 2 - к нижнему слою, λ – теплопроводность, a – температуропроводность, V – скорость движения, B – температура на нижней границе $z=H$, h – толщина верхнего слоя.

На рис.11 приведен пример расчета теплового потока при наличии вертикального движения литосферы (экспериментальные данные теплового потока предоставлены Христофоровой Н.Н.) [8].

Проведено также численное моделирование поля 3-х мерного нестационарного распределения температуры в 2 и 3-слойной моделях литосферы при наличии современных вертикальных движений. Оказалось, что использование средних значений теплофизических параметров не позволяет объяснить современные вертикальные движения земной коры только вариациями теплового поля. Так, при вертикальных скоростях порядка 2мм/год за 100 тыс. лет достигнуто лишь 6% превышение теплового потока над фоновым.

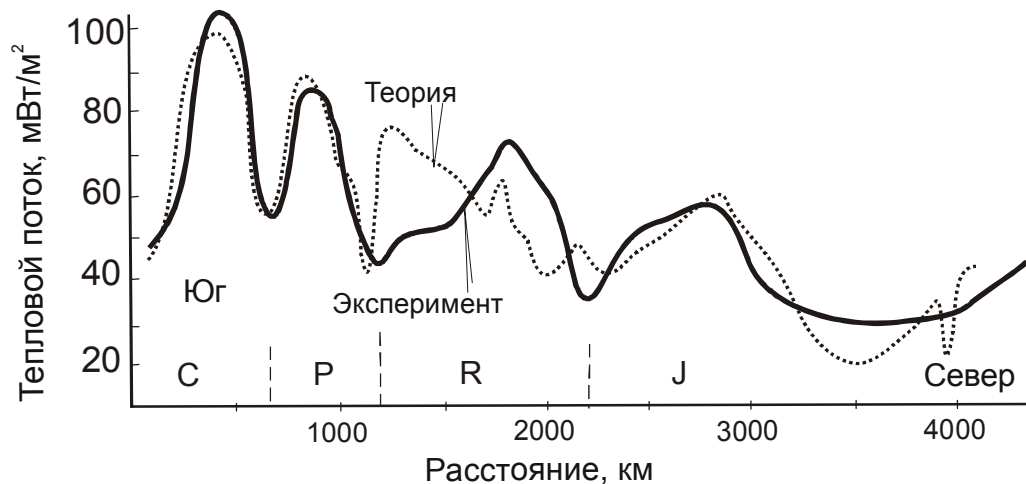


Рис.11. Экспериментальное и теоретическое распределение теплового потока при наличии современного вертикального движения земной коры вдоль профиля Московская синеклиза - Кавказ;

выделены ячейки:

J- Ярославская ($a_2=8 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_2=28$ Вт/м К, $q_{фон}=68$ мВт/м²)

R –Русская ($a_2=8 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_2=20$ Вт/м К, $q_{фон}=67$ мВт/ м²)

P – Предкавказская ($a_2=4 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_2=9$ Вт/м К, $q_{фон}=40$ мВт/ м²)

C – Большого Кавказа ($a_2=7 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_2=9$ Вт/м К, $q_{фон}=55$ мВт/ м²)

В разделе 3 моделируется влияние на распределение температур в литосфере наличия различного вида трехмерных геологических структур с теплофизическими параметрами, отличными от вмещающих пород. Численно решается трехмерное уравнение теплопроводности

$$\text{div}(\lambda(x, y, z) \text{grad} T) = 0, \quad 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z < L_z. \quad (13)$$

Показано, что влияние неоднородных структур на распределение температуры может достигать единиц градусов, что определяет необходимость учета их вклада в общую картину теплового поля. Анализируется зависимость величины термоградиента от толщины высокотеплопроводного слоя структуры. Установлено, что корреляция температурного градиента соленосных отложений и их толщины может варьироваться значительно в зависимости от вида структуры.

Приводятся примеры расчета температурного поля Канчуринского подземного хранилища газов. По геологическому строению Канчуринское ПХГ есть известковый риф, иначе купол с крутыми склонами в массиве соленосных отложений. Область повышенных значений теплового потока (рис.13) оконтуривает риф, демонстрируя изменение направления теплового потока в сторону пород с наибольшей теплопроводностью.

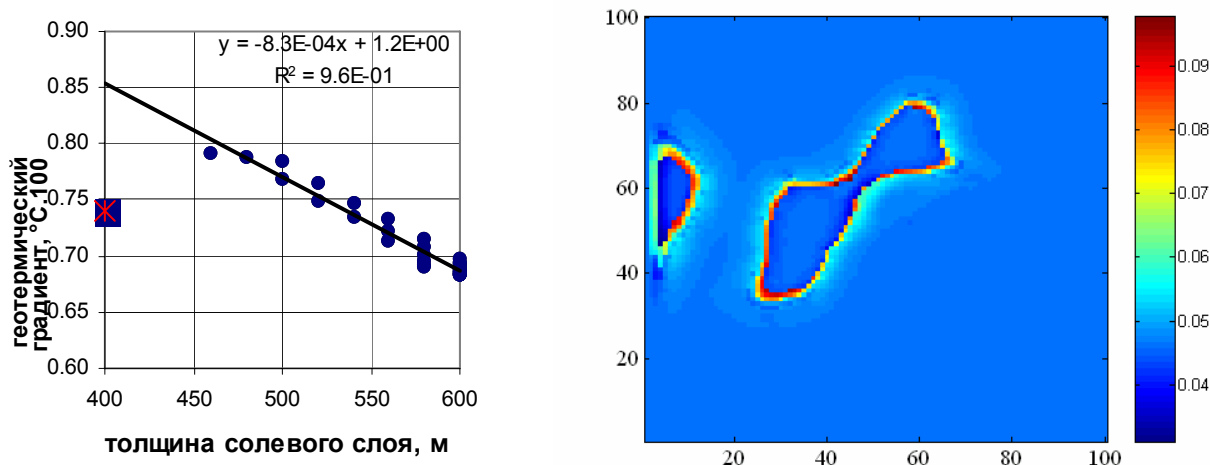


Рис. 12. Зависимость геотермического градиента от толщины солей для модели «выпуклая линза».

Рис.13 Расчетная карта тепловых потоков (Вт/ м^2) Канчуринского ПХГ на срезе 1300 м (дискретизация 30 м x 20 м).

В разделе 4 рассматривается влияние конвекционных течений в верхней мантии на тепловое поле приповерхностных толщ Земли. Приведен пример моделирования Предкавказской ячейки. Для обеспечения корреляции с геотермическими данными потребовались значительные перепады температур на нижней границе литосферы порядка 1000°C .

В Приложении приводятся математические алгоритмы, использованные при составлении расчетных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе методами вычислительного эксперимента исследованы флюидодинамические процессы в подземной гидросфере, по данным натурных исследований разработаны модели для расчетов физических величин, характеризующих эти процессы: полей давлений, температур и деформаций в пористых и трещиновато-пористых пластах верхней литосферы. Полученные результаты связывают воедино тепловые, фильтрационные и деформационные процессы, что является важным шагом на пути создания комплексных динамических моделей эволюции верхней литосферы, происходящей под воздействием совокупности природных и антропогенных факторов различной интенсивности и длительности. В практическом плане все это является основой для построения постоянно действующих моделей разработки ресурсов гидросферы, а также для создания систем экологического мониторинга приповерхностных вод.

В соответствии с задачами исследования:

1. Построена модель, адекватно описывающая неравновесную фильтрацию жидкости в трещиновато-пористой среде на переходных и периодических режимах. Выполнены исследования фильтрации на переходном режиме с учетом неоднородностей пласта, послепритока, нелинейных зависимостей проницаемости от давления и с учетом композиций этих факторов, определена роль временных параметров, разработаны методы их оценки. Показано, что для рассмотренных примеров из сопоставления с экспериментальными кривыми порядок значений временного параметра τ_2 , пропорционального упругоемкости блоков и феноменологического параметра τ_p , определяющего релаксацию давления при изменении скорости потока может быть оценен как $10^3 - 10^4$ с; на временах наблюдения $t < \tau_p$ релаксационный параметр τ_p , в основном, определяет вид кривой восстановления давления, а на больших временах основную роль играет соотношение упругоемкостей трещин и блоков. Разработан способ верификации фильтрационных моделей, основанный на

комплексном анализе амплитудо- и фазо-частотных характеристик периодических процессов в пластах и кривой восстановления давления. Полученные результаты были применены для расчетов полей давления в натуральных условиях.

2. Обоснована зависимость между частотами периодических воздействий на трещиновато-пористый пласт, обеспечивающими максимальный обмен между блоками и трещинами, и значениями упругоёмкостей трещин и блоков (параметрами τ' и τ_2). Показано, что нестационарный массообмен в системе блоки-трещины на переходных режимах для нелокальных фильтрационных моделей к моменту времени $t=\tau_2$ составляет значительную величину от первоначального и темп его падения уменьшается с удалением от скважины. По результатам численного моделирования размеров блоков сделан вывод о значительности их линейных размеров (10^{-1} - 10^1 м) в рассмотренных ситуациях. Результаты были использованы для оптимизации разработки трещиноватых коллекторов с использованием нестационарных гидродинамических методов.
3. Разработан метод оценки неоднородностей в распределениях гидродинамических параметров по результатам совместного анализа кривых восстановления давления (область зондирования, как правило, от 10 м от скважины), температуры (до 10 м) и временной зависимости значений эффективного коэффициента Джоуля-Томсона, основанный на вычислении текущих значений гидропроводности (динамической гидропроводности).
4. Разработана неизотермическая модель внедрения в коллектор флюида с температурой, отличной от первоначальной температуры пород, позволившая определить набор времен измерений минимально достаточных для идентификации интервалов внедрения. Обоснованы способы интерпретации термограмм, зарегистрированных в процессе восстановления температуры в толщах, включающих интервалы

возможных техногенных скоплений флюидов при наличии слоев с различными теплофизическими свойствами. Оценены характерные времена температурных изменений в прискважинной зоне при малых объемах поглощаемой жидкости. Разработанный метод для обнаружения мест вторичного скопления жидкостей в коллекторах по данным температурных исследований был использован для контроля состояния надпродуктивных толщ месторождений углеводородов и подземных хранилищ газа

5. На основе разработанных алгоритмов и анализа результатов расчетов полей деформаций горных пород в условиях нестационарной фильтрации предложено использовать исследования пространственной производной от смещений для определения местоположений неоднородностей в пласте.

По результатам исследования вклада современных вертикальных движений земной коры в вариации теплового поля верхних толщ литосферы при ее многослойном трехмерном представлении установлено, что величина теплового потока пропорциональна скорости движения, но использование предполагаемых значений теплофизических параметров не позволяет объяснить вариации теплового поля только указанным фактором.

Путем исследования вариаций температурных полей при наличии макромасштабных геологических структур типа «линза», «купол», «склон» и т.п., показано, что влияние неоднородных структур на распределение температуры в области структуры может достигать единиц градусов, что определило необходимость учета их вклада в общую картину теплового поля.

Установлено, что корреляция температурного градиента соленосных отложений и их толщины может варьироваться в значительных пределах в зависимости от вида структуры, причем для профилей с монотонным изменением толщины зависимость линейна.

Рассмотрение конкретных примеров расчетов влияния конвективных течений верхней мантии на тепловое поле приповерхностной толщи показало, что только при значительных температурных неоднородностях (10^3 °С) на нижней границе литосферы возможно их обнаружение по температурным наблюдениям в приповерхностной толще земной коры.

Автор благодарен своему первому учителю профессору М.А. Пудовкину, профессорам Непримерову Н.Н., Молоковичу Ю.М., А.Н.Саламатину и В.А. Чугунову, доц. Маркову А.И, доц. В.Д.Глушенкову, сотрудникам нефте - и газодобывающих предприятий Фархуллину Р.Г., Хисамову Р.С., Сулейманову Э.И., Никашеву О.А., Смыкову Р.С. и многим другим, сотрудникам кафедры радиоэлектроники, сотрудникам группы Молоковича Ю.М., Маркова А.И. за многолетние экспериментальные измерения и сотрудничество.

Общая литература.

I. Darcy A. Les fontaines publiques de la ville de Dyon / A.Darcy.- Paris: Victor Dalmont, 1856.

П. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э.Б. Чекалюк. - М.: Недра, 1965.-238 с.

Ш. Баренблатт Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. - М.: Недра, 1984. - 211с.

IV. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика / В.Н. Николаевский. - М.: Недра. – 1996. - 447 с.

V. Jou D. Extended irreversible thermodynamics revisited (1988-98) / D. Jou, J. Casas-Vasquez , G. Lebon// Rep. Prog. Phys. -1999.-V.62.-P.1035-1142.

VI. Николаев С.А. Теплофизика горных пород/ С.А.Николаев, Н.Г. Николаева, А.Н. Саламатин. - Казань: изд-во Казан. ун-та, 1987. - 130с.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих

работах:

1. Пьезометрия окрестности скважин. Теоретические основы./ Молокович Ю.М., Марков А.И., Давлетшин А.А., Куштанова Г.Г. – Казань: изд-во ДАС, 2000.- 203 с.
2. Выработка трещиновато-пористого коллектора нестационарным дренированием / Молокович Ю.М., Марков А.И., Сулейманов Э.И., Фархуллин Р.Г., Куштанова Г.Г [и др.]. -Казань: изд-во Регентъ, 2000 -156 с.
3. Куштанова Г.Г. Температурный контроль разработки месторождений нефти и газа/ Г.Г. Куштанова. - Казань: Новое знание, 2003-178с.
4. Глушенков В.Д. Термогидрогазодинамическое изучение эксплуатационных скважин / В.Д. Глушенков, Г.Г. Куштанова [и др.] // Газовая промышленность.-1984.- № 11.- С.22-24.
5. Neprimerov N.N. Correlation of heat flow with tectonics (convective cells) and hydrogeological fields/ N.N. Neprimerov, N.N. Khristoforova, G.G. Kushtanova //Revista Brasileira de Geofisica, -1989.-vol. 7(2).-P.129-139.
6. Исследование особенностей фильтрации жидкости в карбонатных коллекторах/ А.А. Давлетшин, Г.Г. Куштанова [и др.] // Нефтяное хозяйство.- 1998.-N 7.-С.30-32.
7. Молокович Ю.М. Исследование карбонатных пластов на перспективность методом нестационарного дренирования/ Ю.М. Молокович, А.И. Марков, А.А. Давлетшин, Г.Г. Куштанова [и др.]// Нефтяное хозяйство.-2002.- № 2.- С.50-52.
8. Христофорова Н.Н. Связь теплового потока с динамикой литосферы / Н.Н. Христофорова, Г.Г. Куштанова, В.А. Чугунов // Георесурсы.-2001. - №1(5).-С.43-45
9. Kushtanova G.G. Variation of Heat Flow Produced by the Local Geological Structures / G.G. Kushtanova // Georesources. - 2000-N 3 –P.34-35.
10. Овчинников М.Н. Особенности применения периодических гидродинамических режимов при разработке трещиновато-пористых коллекторов/ М.Н. Овчинников, А.Г. Гаврилов, Г.Г. Куштанова [и др.] //

Георесурсы.-2007.-№3(22).

11. Куштанова Г.Г. Восстановление давления при неравновесном законе фильтрации жидкости в пласте / Г.Г. Куштанова//Труды межд. Форума по проблемам науки, техники и образования. - Москва, 5-9 сент. 2005.-т.3.-С.99-100.

12. Глушенков В.Д. Особенности термограмм в скважине с продуктивным горизонтом, перекрытым насосно-компрессорными трубами/ В.Д.Глушенков, В.К. Десятков, Г.Г. Куштанова [и др.]// Физико-химическая гидродинамика, Баш. ун-т.-1987.-С.59-66.

13. Марков А.И.. Температурные аномалии, вызванные падением пластового давления в газовой залежи и их практическое использование/ А.И. Марков, В.Д. Глушенков, Г.Г. Куштанова, В.Ф.Шулаев//Реф. сб. Разработка и эксплуатация газовых и морских нефтяных месторождений.- 1981.-№ 8.-С.27-37.

14. Khodyreva E.Ja. Vertical and lateral variations of geothermal parameters within local geological structures / E.Ja. Khodyreva, G.G. Kushtanova// Proceedings of int. conf. The earth's thermal field and related research methods, Moscow, may 19-21, 1998.-P.119-122.

15. Kushtanova G.G. Variations of a thermal flow produced by the local geological structures/ G.G. Kushtanova// Paper of IC Geometrization of Physics IV, Kazan, october 4-8, 1999.-P.176-178.

16. Куштанова Г.Г. Обработка кривой восстановления давления с учетом притока [электронный ресурс] / Г.Г.Куштанова // Нефтегазовое дело. - 2006. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Kushtanova/Kushtanova_1.pdf, свободный.

17. Куштанова Г.Г. Некоторые особенности нестационарной фильтрации в трещиновато-пористых коллекторах [электронный ресурс] / Г.Г.Куштанова // Нефтегазовое дело.-июнь, 2007.- Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Kushtanova/Kushtanova_2.pdf, свободный

18.А.С.1184929 СССР, МКИЗ Е 21 В 47/00. Способ определения параметров пластов с различными пластовыми давлениями, вскрытых единым фильтром/Десятков В.К., Марков А.И., Куштанова Г.Г. (СССР)-№ 3675659/22-03; заяв. 21.12.83; опубл.15.10.85; Бюл.№ 38 .- 5с.: ил.

19.А.С.1357558 СССР, МКИЗ Е 21 В 47/06. Способ определения пластового давления в пласте многопластовой залежи/Десятков В.К., Марков А.И., Куштанова Г.Г. (СССР).-№ 3996831/22-03; заяв. 25.12.87; опубл.07.12.87. Бюл. № 45-4с.: ил.

20.А.С. 1511378 СССР, МКИЗ Е 21 В 47/10. Способ определения параметров низкопроницаемого газового пласта /Десятков В.К., Куштанова Г.Г., Марков А.И. (СССР) -№ 4304003; заяв.23.06.87; опубл.30.09.89. Бюл.№ 36.-4 с. ил.

21.Патент 2013533 РФ, МПК Е 21 В 47/00. Способ обнаружения техногенных скоплений флюидов в геологических объектах, вскрытых скважиной» / Давлетшин А.А., Даминов Н.Г., Куштанова Г.Г., Марков А.И., Шулаев В.Ф.-№ 4942572/03; заяв. 05.06.91; опубл.30.05. 94. Бюл. № 10.-12с.: ил.

22.Патент 2109130 РФ, МПК Е 21 В 43/16 ."Способ извлечения нефти из трещиновато-пористого пласта-коллектора /.А.Давлетшин, Г.Г.Куштанова, А.И.Марков, Ю.М.Молокович, Р.Х.Муслимов, О.А.Никашев, Э.И.Сулейманов, Р.Г.Фархуллин.-№ 96111794/03; заяв.4.06.96; опубл.20.04. 98. Бюл.№ 11.- 18 с.: ил.

23.Патент 2166069 РФ, МПК Е 21 В 43/20. Способ разработки нефтяных месторождений в условиях заводнения/ Овчинников М.Н., Куштанова Г.Г.- № 2000110967/03; заяв. 28.04.2000; опубл.27.04.2001. Бюл. № 12 .- 10с.

24.Патент 2188320 РФ, МПК Е 21 В 49/00, 47/06. Способ определения распределения давления и границ неоднородностей пласта / Овчинников М.Н., Завидонов А.Ю., Куштанова Г.Г. - № 2001102010/03; заяв. 22.01.2001; опубл. 27.08.2002. Бюл. № 24.-12с.: ил.

25.Свидетельство РОСАПО об официальной регистрации программы для

ЭВМ 990960. Программа моделирования нестационарных фильтрационных потоков в нефтяных пластах (программа для ЭВМ)/ М.Н. Овчинников, Г.Г. Куштанова. Официальный Бюллетень РОСАПО (программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем).-2000.-№1(30).-С.171.

26.Свидетельство РОСАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612368. Моделирование нестационарной фильтрации в трещиновато-пористом пласте по неравновесному закону (РЕЛФИЛ)/ Г.Г. Куштанова. Официальный Бюллетень РОСАПО (программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем).-2006.-№4(57).-С.24

27. Свидетельство РОСАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612347 Моделирование фильтрационных волн давления при неравновесной фильтрации (ФВД)/М.Н. Овчинников, Г.Г. Куштанова. Официальный Бюллетень РОСАПО (программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем).-2006.-№4(57).-С.19.